14

Meteorización de las rocas y suelos

El suelo, considerado como una roca, une las piedras comunes con la atmósfera, y el polvo muerto de la tierra con la continuidad de la vida.

Grenville A. J. Cole, 1913.

Meteorización y clima

La meteorización es el efecto total de todos los variados procesos subaéreos que cooperan en el trabajo de descomposición y desintegración de las rocas, mientras no esté involucrado un transporte a gran escala de los productos desmenuzados. El trabajo de la arroyada y del viento son esencialmente erosivos y por eso no se incluyen. Los productos de la meteorización, no obstante, están sometidos a la acción de la gravedad y, por consiguiente, hay una tendencia universal, por parte de los materiales sueltos, a caer o deslizarse cuesta abajo, en especial si se ven lubricados por el agua (cap. 17). Realmente, las superficies frescas sólo quedan expuestas a la acción ulterior de los procesos de meteorización cuando se han eliminado, por erosión, los productos de meteorización que las cubrían. No se puede, pues, intentar establecer una línea de división tajante entre meteorización y erosión.

La acción geológica llevada a cabo por la meteorización es de dos clases: *a*) cambios físicos o mecánicos, en los que los materiales se desintegran a causa de los cambios de temperatura, la acción de las heladas y los organismos, y *b*) cambios químicos, en los que los minerales se descomponen, se disuelven y se desmenuzan por acción del agua, oxígeno y anhídrido carbónico contenidos en la atmósfera y en el agua del suelo, y de los organismos y sus productos de descomposición. Los agentes físicos, químicos y biológicos cooperan activamente entre sí. La fracturación requiere unos esfuerzos suficientemente fuertes para superar la resistencia de los materiales, pero la resistencia va reduciéndose gradualmente por la acción progresiva de descomposición. La fracturación, a su vez, aumenta las posibilidades de penetración mayor de los agentes químicos. En todas partes se aprovechan las juntas, la estratificación, la exfoliación y las grietas de formación reciente para que el aire, el agua y las raicillas penetren a profundidades bastante considerables (figura 14.1). Así, aunque los procesos de meteorización se pueden considerar por separado, no debe olvidarse que el trabajo realizado es el efecto resultante de varios procesos que actúan juntos en cooperación íntima.

Los productos finales son fragmentos rotos de minerales y rocas; productos de descomposición residuales, como la arcilla, y productos de descomposición solubles, que son llevados disueltos. Los productos de meteorización varían mucho según las localidades, de acuerdo con las condiciones climáticas y el relieve y configuración de la superficie. En general, puede decirse que el desmenuzamiento se favorece en condiciones de pendientes abruptas y clima helado o desértico; a la descomposición y a la disolución les son favorables un relieve suave y condiciones húmedas, en especial en regiones tropicales. En las zonas templadas, el tiempo es muy variable, y la mayor parte de los procesos principales actúan en una u otra estación del año.

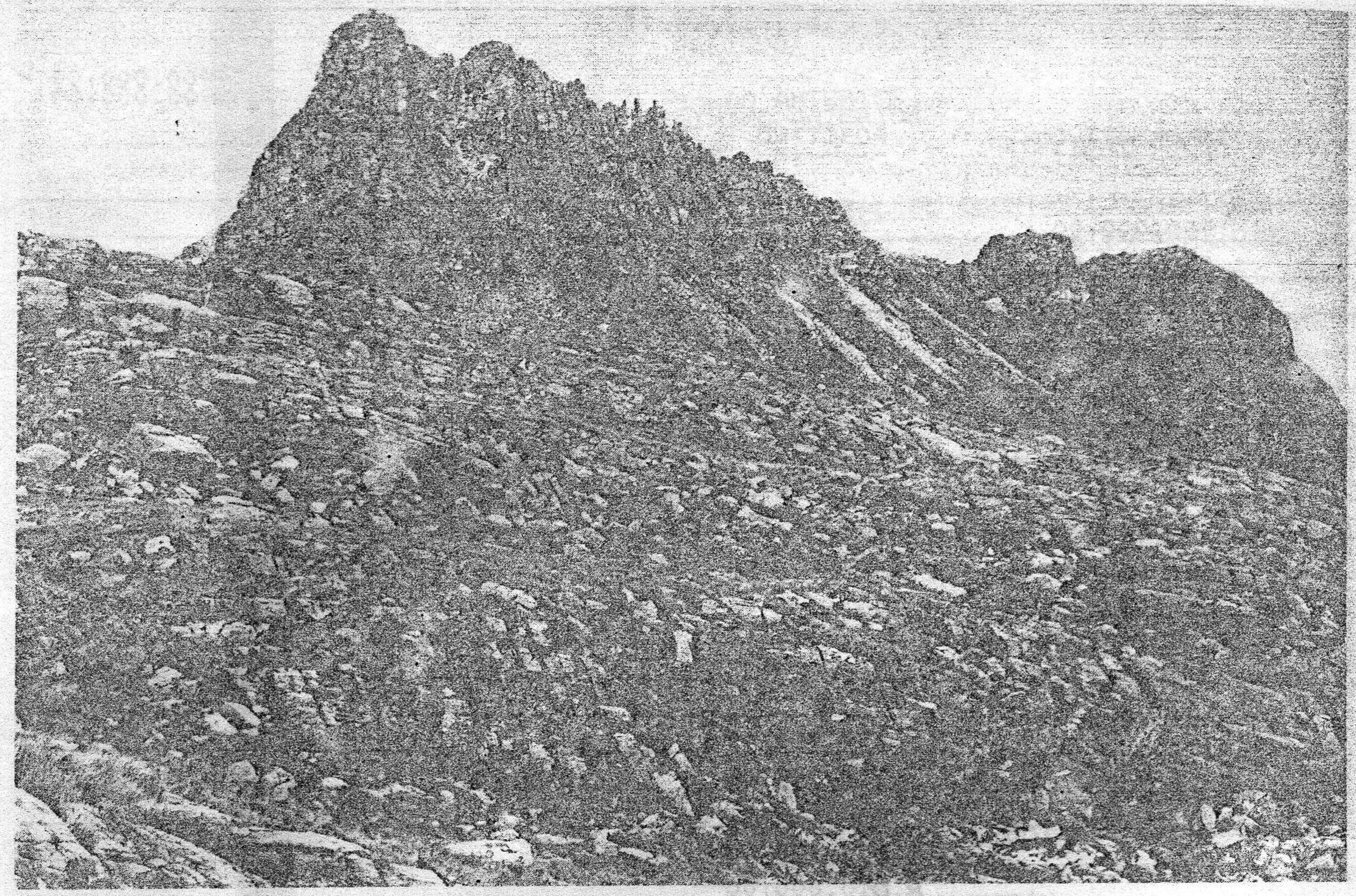


Figura 14.1. Stac Polly, Highlands noroccidentales de Escocia, pico de arenisca torridoniense discordante sobre gneis lewisiense. El perfil dentado y el ensanchamiento de las diaclasas y de otros planos de división ilustran los efectos de la meteorización encabezada por el efecto de cuña de las heladas *(L. S. Paterson)*.

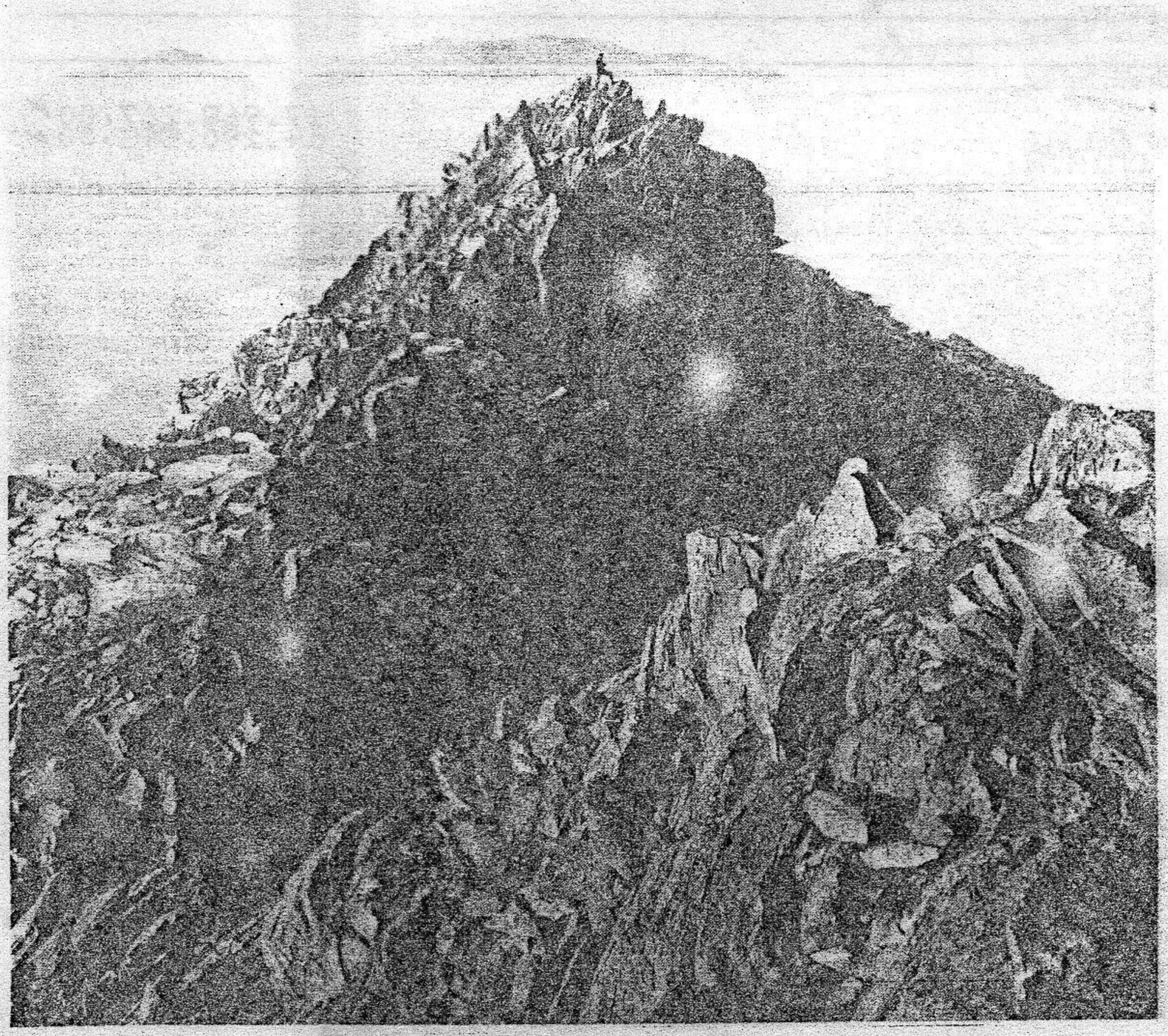


Figura 14.2. Fracturación por las heladas de rocas ígneas ordovícicas, pico norte de Tryfaen, Gales septentrional *(G. P. Abraham Ltd., Keswick)*.

Figura 14.3. Canchales de rocas ígneas terciarias (granófido y gabro) de Austerhorn, Islandia. Para su localización, véase la figura 12.9 *(L. Hawkes)*.

Desintegración por cambios de temperatura

La helada es un agente fragmentador de rocas irresistible. Cuando el agua penetra por las grietas, poros y hendiduras de las rocas y luego se congela, se dilata más del 9 por ciento de su volumen y ejerce una presión de unos 150 kg por centímetro cuadrado. Las rocas se rompen y los fragmentos se separan, como si entre ellos se metiera una cuña, y con el deshielo quedan sueltos. Las laderas escarpadas y los riscos son especialmente propensos a sufrir este tipo de destrucción, sobre todo si tienen diaclasas bien desarrolladas (figs. 14.1 y 14.2). Los fragmentos producidos a causa de las heladas caen hasta niveles más bajos y se acumulan en forma de *canchales* (fig. 14.3). La naturaleza traicionera de estas laderas de cantos angulosos está implicada en el término «*scree*», que es una vieja palabra escandinava que significa cascajo, que se desliza bajo los pies cuando se camina sobre él.

En climas áridos, las rocas expuestas al sol abrasador se calientan mucho y, como consecuencia de ello, la costra superficial se dilata y tiende a separarse de la capa más fría situada a pocos centímetros por debajo de ella. En condiciones de sequedad total, el esfuerzo así desarrollado es insuficiente para fracturar rocas masivas no meteorizadas. Los experimentos no dejan dudas a este respecto. Pero en los experimentos también se ve que, en presencia de agua, las repeticiones alternantes de calentamiento y enfriamiento producen a veces ruptura. En condiciones naturales, las rocas masivas deben debilitarse por meteorización química antes de que se puedan separar costras y hojuelas de roca y se rompan en fragmentos menores. Incluso en el desierto, la alteración química actúa constantemente; claro que su acción es muy lenta, pero el tiempo es largo. El proceso se facilita por el enfriamiento rápido debido a tormentas súbitas, ya que en los escasos aguaceros que se producen en las regiones desérticas, la lluvia puede estar a una temperatura próxima al punto de congelación, e incluso, a veces, cae gra-

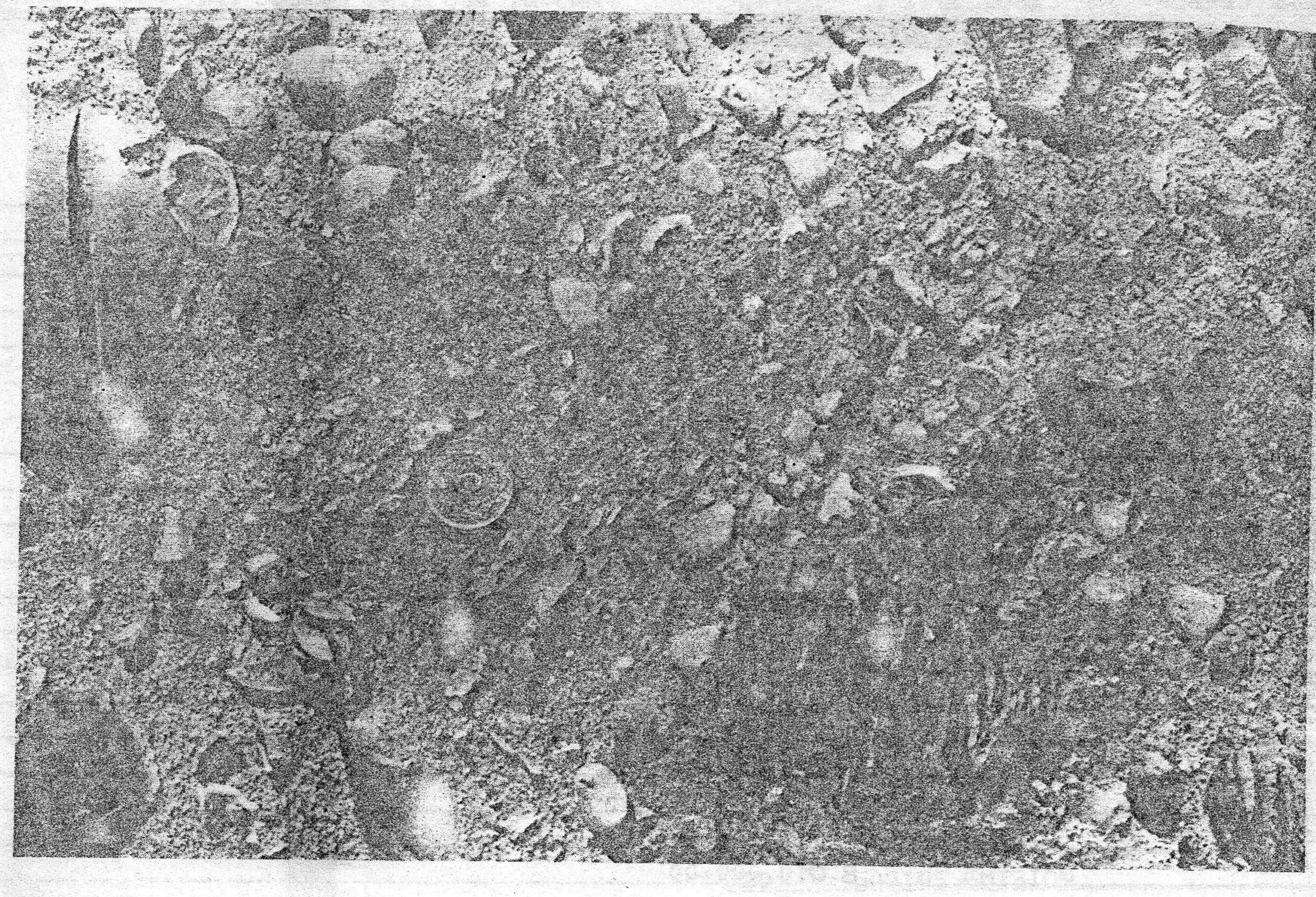


Figura 14.4. Superficie del desierto en las proximidades de las Pirámides, en el Cairo, que presenta cantos «rotos al sol». La fragmentación debida a cambios de temperatura es posterior al debilitamiento previo producido por meteorización química. *(J. J. Harris Teall).*

nizo. La contracción resultante ensancha cualquier grieta que se haya podido desarrollar perpendicularmente al suelo, y el agua encuentra un paso, temporal pero efectivo, incluso en la más resistente de las piedras. Los minerales individuales se hinchan y se encogen y gradualmente se van desmenuzando, especialmente en rocas de grano grueso, como el granito. La desintegración de cantos en la superficie del desierto suele llamar la atención (fig. 14.4).

Allí donde las rocas están estratificadas o diaclasadas paralelamente a la superficie, la separación de láminas de rocas se produce muy fácilmente. Aquí son importantes las diaclasas de relajación (pág. 154). Sin embargo, esta separación puede darse, y de hecho se da, a una escala espectacular, allí donde las rocas afectadas son masivas o tienen planos estructurales de debilidad (como la foliación) que casi son paralelos a la superficie existente. El descortezado o pelado de

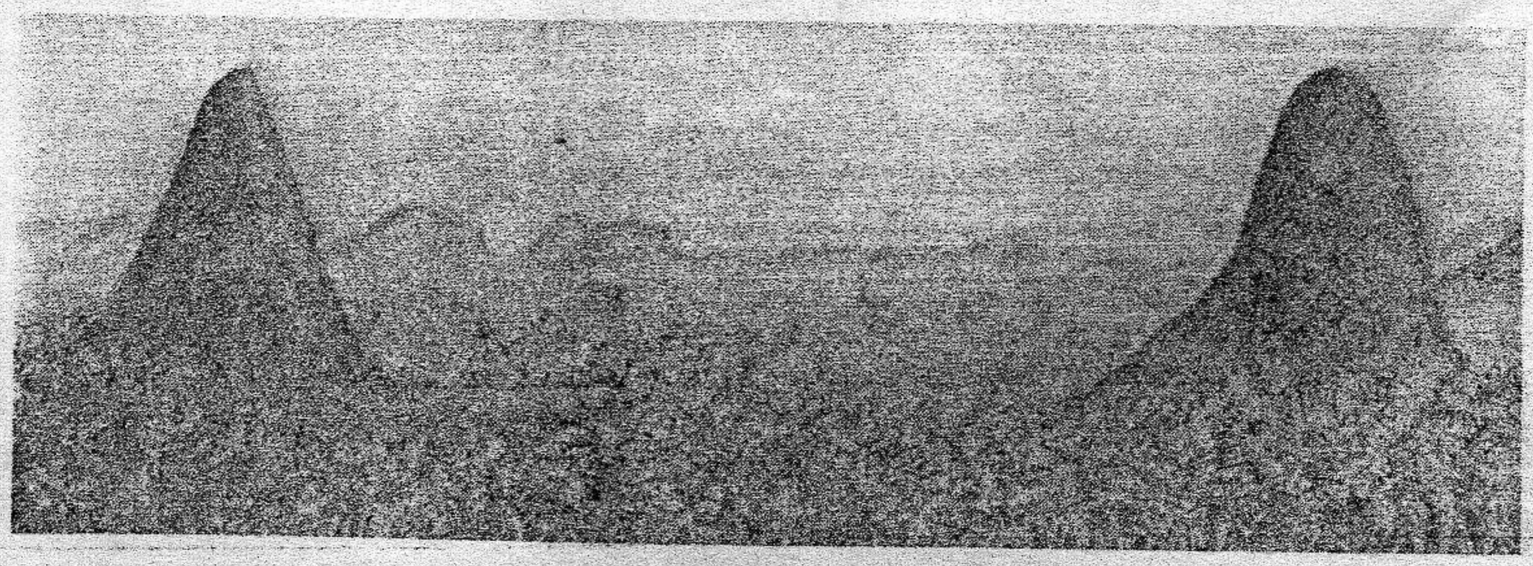


Figura 14.5. Magnífico ejemplo de paisaje de tipo monte-isla, al norte de Ribaue, Mozambique (*Dibujo de E. J. Wayland,* 1911).

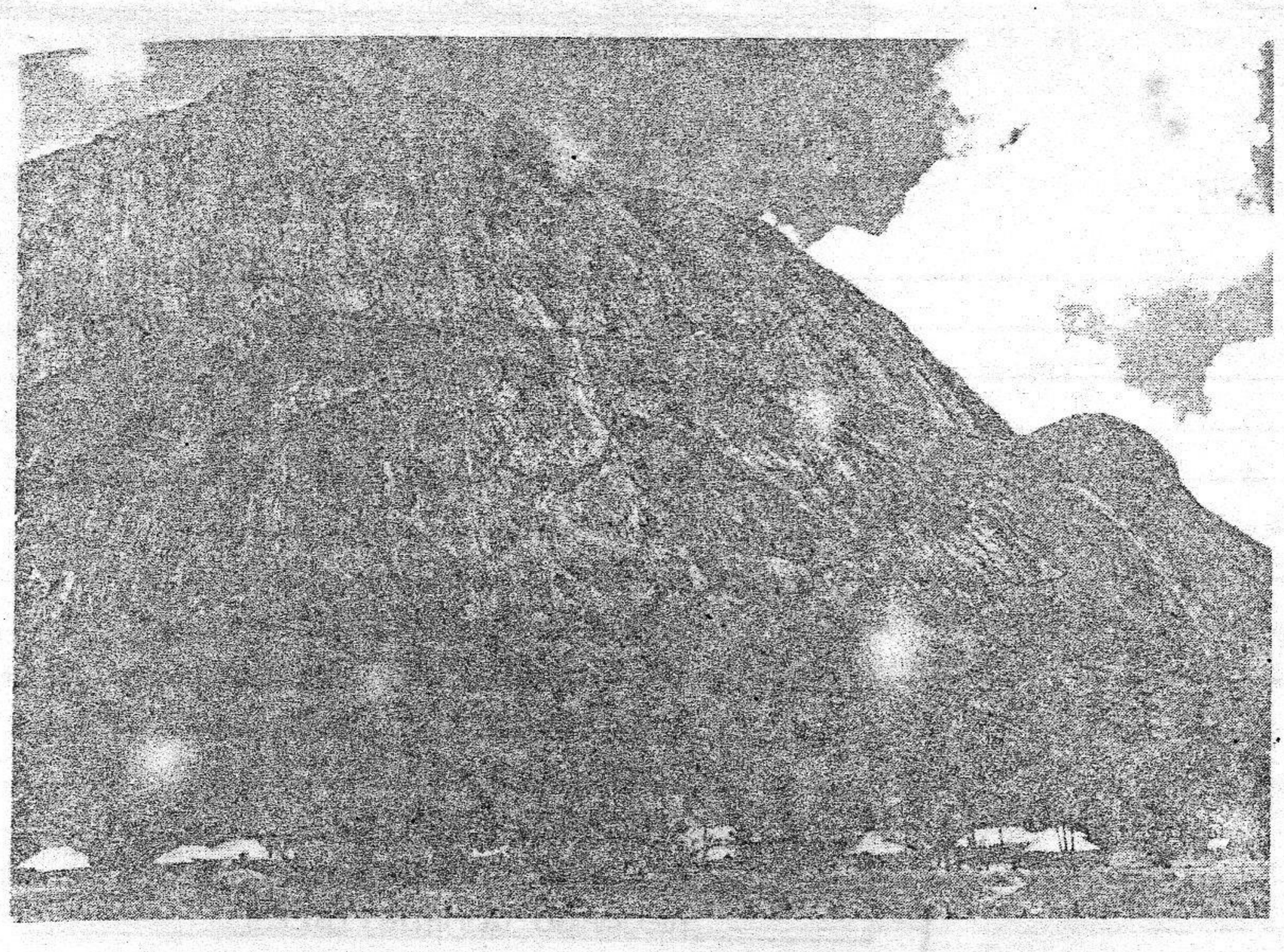


Figura 14.6. Exfoliación en un dique anular de sienita, que se eleva unos 900 m sobre el pueblo que se ve a primer término. Complejo de la mescta de Chambe, Malawi *(R. L. Kinsey, gentileza del Departamento Federal de Información, Rodesia del Sur).*

hojuelas y costras curvas de rocas, fenómeno denominado *exfoliación,* da un aspecto muy característico a las superficies y laderas de las abruptas colinas y picos de las tierras más tórridas. Los efectos de la exfoliación están especialmente bien desarrollados en los montes-isla («inselbergs») desnudos y de laderas escarpadas africanos (fig. 14.5). Bordes angulosos, esquinas recién fracturadas y puntas sobresalientes se vuelven muy pronto romos, porque los cambios químicos y de temperatura pueden penetrar allí más profundamente en la roca que en los lugares de superficie menos irregular. Las colinas adquieren forma de domo, y sus laderas se vuelven cada vez más abruptas en el transcurso del tiempo. En las laderas convexas se pueden ver capas sucesivas de rocas, imbricadas como las tejas de un tejado, cada una de las cuales está a punto de desprenderse, lo que ocurrirá en cuanto quede libre con la formación de grietas perpendiculares a la superficie. A veces, después de la puesta del sol, se puede oír el ruido que produce una roca al resquebrajarse o el de su caída cuesta abajo.

La exfoliación parece ser el resultado de un complejo grupo de procesos que incluyen y cooperan con los esfuerzos provocados por la alternancia diaria de expansión y contracción, de modo que esta alternancia puede ser un agente de destrucción mucho más efectivo de lo que parece, por sí misma, en el laboratorio. Esta culminación es consecuencia de la «fatiga» producida por los muchos millones de repeticiones de calentamiento y enfriamiento que la parte externa de una roca debe sufrir antes de que se fracture. El principio implicado es el de que los esfuerzos se concentran, y la actividad química aumenta mucho en el interior de las grietas, incluso de las más diminutas. Por ello, la debilitación preliminar por meteorización química puede ser imperceptible. Investigaciones recientes del desarrollo de grietas en materiales estructurales (por ejemplo, en los usados en los jets) han revelado que una raja superficial microscópica puede ser suficiente para iniciar una grieta que puede terminar en desastre. Al principio, la grieta incipiente se abre y se extiende tan lentamente que apenas se distingue, pero tarde o temprano, según los esfuerzos implicados, se llega a un punto crítico y, bruscamente, la grieta se convierte en una fractura que se desarrolla a una tasa 10 000 veces mayor o aún más.

La acción de los animales y las plantas

Las lombrices de tierra y otros animales excavadores, como los roedores y los termes, juegan un papel importante en la preparación del material para su remoción por la arroyada y el viento. Los gusanos consumen grandes cantidades de suelo para obtener comida y las partículas no dige-

ribles las evacúan como excrementos. En un suelo promedio puede haber 370 000 lombrices por hectárea, que en el transcurso de un año pueden sacar a la superficie de 24 a 30 toneladas de materiales finamente triturados.

Las raicillas en crecimiento de arbustos y árboles ejercen una fuerza casi increíble al profundizar entre las grietas. No suele pensarse que la celulosa de la que están hechas todas las paredes celulares es más resistente que muchos metales. Las grietas se ensanchan por expansión durante el crecimiento (figs. 3.3 y 14.7) y actúan como cuñas que oprimen lateralmente. Plantas de todo tipo, incluyendo hongos y líquenes, también contribuyen a la meteorización química, ya que extraen determinados elementos de los materiales que forman las rocas y liberan otros. Además, el agua que contiene bacterias ataca los minerales de las rocas y los suelos mucho más vigorosamente de lo que lo haría si no las tuviera. Los residuos muertos de los organismos se descomponen en el suelo, principalmente a consecuencia de las actividades de bacterias y hongos. De este modo se liberan anhídrido carbónico y ácidos orgánicos, junto con trazas de amoníaco y de ácido nítrico, los cuales, juntos, aumentan el poder disolvente del agua del suelo. El principal producto orgánico es un «complejo» de sustancias pardas y gelatinosas conocido con el nombre de *humus*. El humus es el constituyente orgánico característico del suelo, y el agua cargada con ácidos húmicos puede disolver determinadas sustancias, como la limonita, que ordinariamente son insolubles.

Otro efecto de la vegetación, de vital importancia en la conservación de la naturaleza, es su acción protectora. Las raicillas aprisionan el suelo en una tupida red, de modo que se mantiene poroso y capaz de absorber agua sin ser arrastrado por ella. Los efectos destructivos de la lluvia y del viento quedan así restringidos. En este aspecto, las raíces de las hierbas son especialmente efectivas. Los bosques quitan fuerza a la lluvia y retardan la fusión rápida de la nieve. Además, regularizan la precipitación e impiden las súbitas inundaciones que afectan a las regiones más esté-

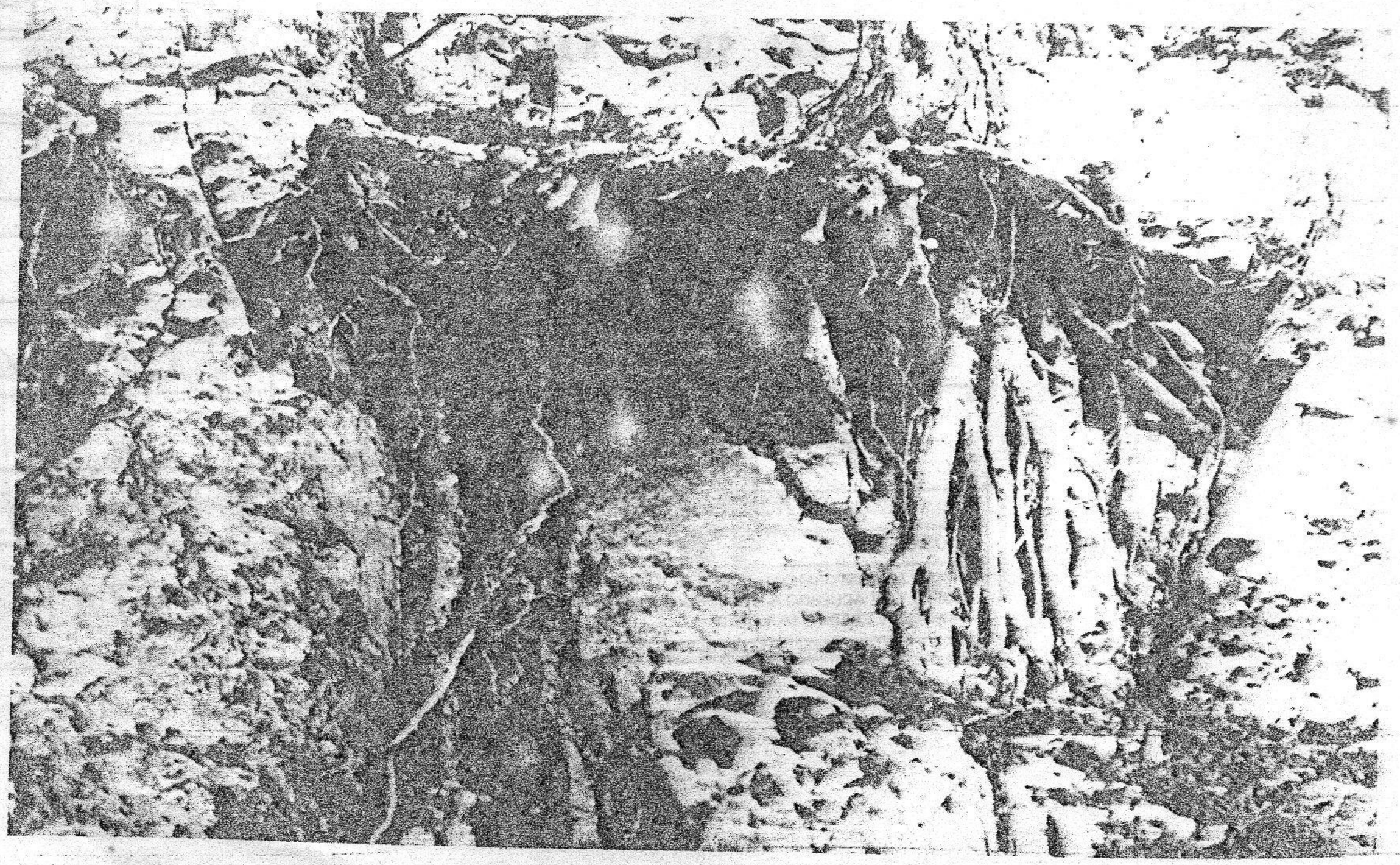


Figura 14.7. Raíces de árboles al descubierto después de actuar como cuñas en las rocas que originariamente constituían márgenes de un río; cf. figura 3.3 *(S. H. Reynolds).*

riles. Por todo ello, la indiscriminada eliminación de bosques puede hacer peligrar la prosperidad de pueblos enteros. La erosión del suelo se intensifica, las tierras agrícolas se empobrecen y se agotan, y en su lugar quedan tierras yermas abarrancadas y desnudas, como los «badlands» o «tierras malas» de Norteamérica (pág. 353). En las tierras cubiertas de bosques, los ríos llevan aguas limpias, exceptuando los días inmediatamente siguientes a lluvias copiosas, pero después de la deforestación, sus aguas están casi permanentemente cargadas de barro. La destrucción de la vegetación natural por tala y roturado, y el descuido en la reposición de árboles, cortados para su explotación o destruidos por el fuego, han tenido consecuencias económicas desastrosas en muchas partes de África y de América. La devastación del suelo ha sido uno de los factores importantes causantes de la caída de civilizaciones antiguas. El propio hombre ha sido, y aún es, uno de los agentes orgánicos de destrucción más pródigos. Actualmente hay una conciencia creciente, casi a nivel mundial, de la urgente necesidad de conservar el suelo y aumentar su fertilidad.

Meteorización química

La alteración y disolución del material de las rocas por medio de procesos químicos se realiza, en gran parte, por el agua de lluvia, que actúa como portadora de oxígeno y anhídrido carbónico disueltos, junto con diversos ácidos y productos orgánicos derivados del suelo. El grado de actividad depende de la composición y concentración de las soluciones así formadas, de la temperatura, de la presencia de bacterias y de las sustancias que lleva en solución procedentes de los minerales descompuestos. Todas las aguas naturales están débilmente disociadas en iones H^+ y $(OH)^-$. La acidez del agua natural se mide por su concentración de iones H^+, el llamado pH. Si el pH es mayor de 7, el agua es alcalina; si es menor de 7, es ácida. Cualquier aumento de acidez aumenta la tasa de las reacciones de meteorización. El pH del agua de lluvia varía entre 4 y 7. Su acidez procede, principalmente, del anhídrido carbónico disuelto, que ioniza el agua:

$$CO_2 + H_2O = H^+ + (CO_3H)^-$$

Los valores de pH más bajos pueden ser debidos a las descargas de rayos, que producen ácido nítrico y otros en pequeñas cantidades. Valores mucho más bajos (inferiores a 2,8) se encuentran en las aguas de algunas turberas, en especial donde se desarrollan mucho el género *Sphagnum* y musgos relacionados.

Los principales cambios químicos que se producen en la meteorización son disolución, oxidación, hidratación o hidrólisis y formación de carbonatos. Sólo unos pocos de los minerales comunes resisten la descomposición, de los cuales el cuarzo y la moscovita (incluyendo la sericita) son los ejemplos principales. Otros, como los minerales carbonatados, pueden ser llevados totalmente en solución. La mayoría de los minerales silicatados quedan reducidos a residuos relativamente insolubles, y liberan sustancias solubles que son transportadas en solución.

A la caliza apenas la afecta el agua pura, pero cuando ésta contiene CO_2, el CO_3Ca de la caliza se disuelve lentamente y se elimina en forma de bicarbonato cálcico, $(CO_3H)_2Ca$. Las plataformas calcáreas, como la de Ingleborough, muestran claramente los efectos de la disolución que han sufrido sus superficies acanaladas y llenas de surcos (fig. 14.8). Las diaclasas están ensanchadas y entre ellas se encuentra la roca desnuda y áspera. La superficie no tiene suelo, excepto en algunas grietas que han atrapado el polvo arrastrado por el viento. En los afloramientos escarpados o verticales de caliza se pueden formar profundas grutas en forma de túneles semicilíndricos, por la acción disolvente del agua de lluvia que se ha concentrado en estrechas canales verticales, como en las intersecciones de diaclasas. Estos cilindros se conocen internacionalmente como *lapiaz* y han llegado a despertar un gran interés porque también se pueden formar en superficies verticales de otras rocas no calcáreas, siempre que el agua que actúa tenga un valor de pH suficientemente bajo. Más adelante se describen acanaladuras verticales análogas desarrolladas en los planos de diaclasas de determinadas rocas basálticas (véase la fig. 14.12).

Cuando la caliza contiene impurezas tales como cuarzo y arcilla, éstas suelen permanecer sin apenas disolverse, se acumulan y constituyen la base mineral de un suelo. La tierra roja, llamada

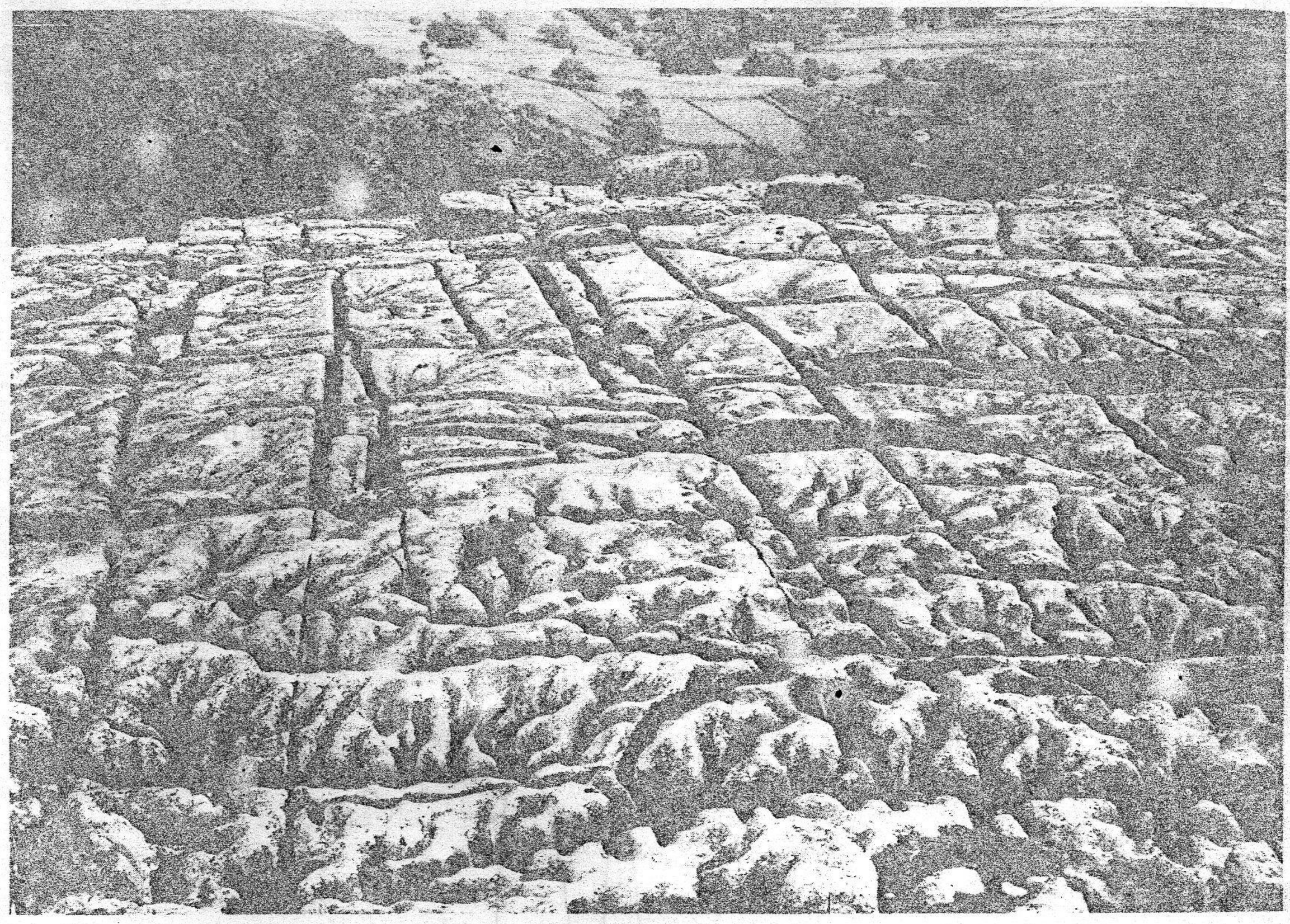


Figura 14.8. Surcos y canales producidos por meteorización química en una superficie calcárea del Great Scar (Carbonífero inferior) sobre la cueva Malham, Yokshire (cf. fig. 6.8) *(Bertrand Unné).*

terra rossa, que cubre las calizas blancas del Karst, meseta situada detrás de la costa adriática de Yugoslavia, es un residuo de meteorización rico en hidróxidos de hierro insolubles, procedentes de la lenta acumulación de ínfimas trazas de compuestos de hierro contenidas en la caliza original. Los minerales arcillosos son los productos residuales principales de la descomposición de los feldespatos. Bajo la acción hidrolizante de las aguas débilmente carbonatadas, los feldespatos se descomponen del modo siguiente:

$$\underset{\text{agua}}{6H_2O} + CO_2 + \underset{\text{Ortosa}}{2Si_3O_8AlK} : \begin{cases} Si_2O_5Al_2(OH)_4 \\ \textit{(mineral arcilloso)} \\ 4SiO(OH)_2 \\ \textit{(«ácido» silícico)} \\ CO_3K_2 \\ \textit{(eliminado en solución)} \end{cases}$$

De la plagioclasa se obtienen productos similares, excepto que se forma CO_3Na_2 a partir de la albita y $(CO_3H)_2Ca$ a partir de la anortita. Probablemente, la mayor parte de la arcilla se encuentra al principio en estado coloidal, o sea, en forma de minúsculas partículas dispersas en el agua, mayores que los iones pero mucho menores que las que puedan verse al microscopio. Estas partículas, en un momento dado, cristalizan en agregados amorfos o en escamas. Los álcalis se disuelven fácilmente, pero mientras la sosa tiende a ser arrastrada y a acumularse en el mar, la mayor parte de la potasa queda retenida en el suelo. El humus y la arcilla coloidal la fijan y las raíces de las plantas la extraen. Al morir las plantas, la potasa vuelve al suelo. Los análisis de agua de río muestran que es muy poca la cantidad de potasa que escapa de la tierra.

Como resultado de ciertas reacciones todavía no

explicadas en detalle, las formas coloidales de la arcilla se descomponen aún más:

$$nH_2O + Si_2O_5(OH)_4Al_2 \left\{ \begin{array}{l} Al_2O_3 \cdot nH_2O \\ \textit{(hidróxido alumínico coloidal)} \\ 2SiO(OH)_2 \\ \textit{(«ácido» silícico coloidal)} \end{array} \right.$$

agua *arcilla*

En las condiciones húmedas de la zona templada, la cantidad de hidróxido de aluminio liberado es pequeña, pero durante la estación seca de las zonas tropicales y monzónicas, precipita bajo una forma muy insoluble y se acumula en superficie o cerca de ella como bauxita (pág. 283).

De la descomposición de los minerales ferromagnésicos se puede dar un ejemplo referido a un tipo simple de piroxeno:

Agua + anhídrido carbónico + $(SiO_3)_2$ Ca (Mg, Fe) → $2SiO(OH)_2$ + bicarbonatos solubles de Ca, Mg y Fe.

(diópsido) *(«ácido» silícico)*

Si además hay Al_2O_3 y Fe_2O_3 (como en la biotita, la augita y la hornblenda), quedan como productos residuales arcilla, minerales cloríticos y limonita. En presencia de oxígeno, la limonita también precipita a partir de soluciones que contengan $(CO_3H)_2Fe$. Ella es la que da el tinte ferruginoso parduzco a las superficies de rocas meteorizadas. El orín corriente, de hecho, es el producto resultante de la acción del agua y el aire sobre el hierro y el acero. La oxidación del hierro no es más que el regreso del hierro a una de las menas comunes de la cual debe haberse obtenido por fundición; es una amenaza económica que implica mucho escombro y gasto.

Lógicamente, los productos residuales de la meteorización son más estables frente al aire y al agua que los minerales madre de los que proceden. Como resultantes de procesos de oxidación e hidratación, contienen una proporción mayor de iones negativos, O^{-2} y $(OH)^-$, que los minerales

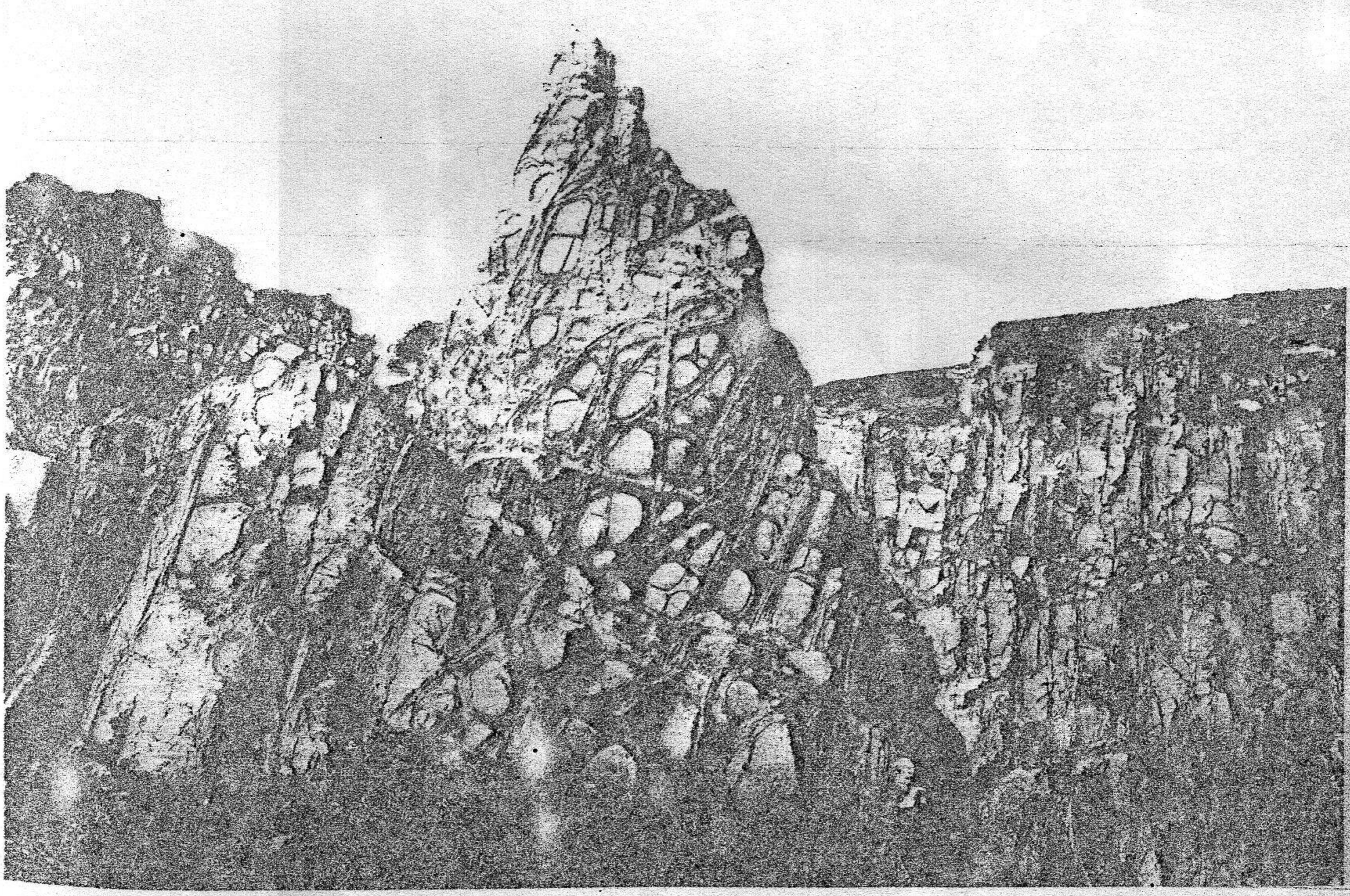


Figura 14.9. Meteorización esferoidal en un manto interestratificado de dolerita, al norte de Queensferry, Fife *(Instituto de Ciencias Geológicas de Gran Bretaña).*

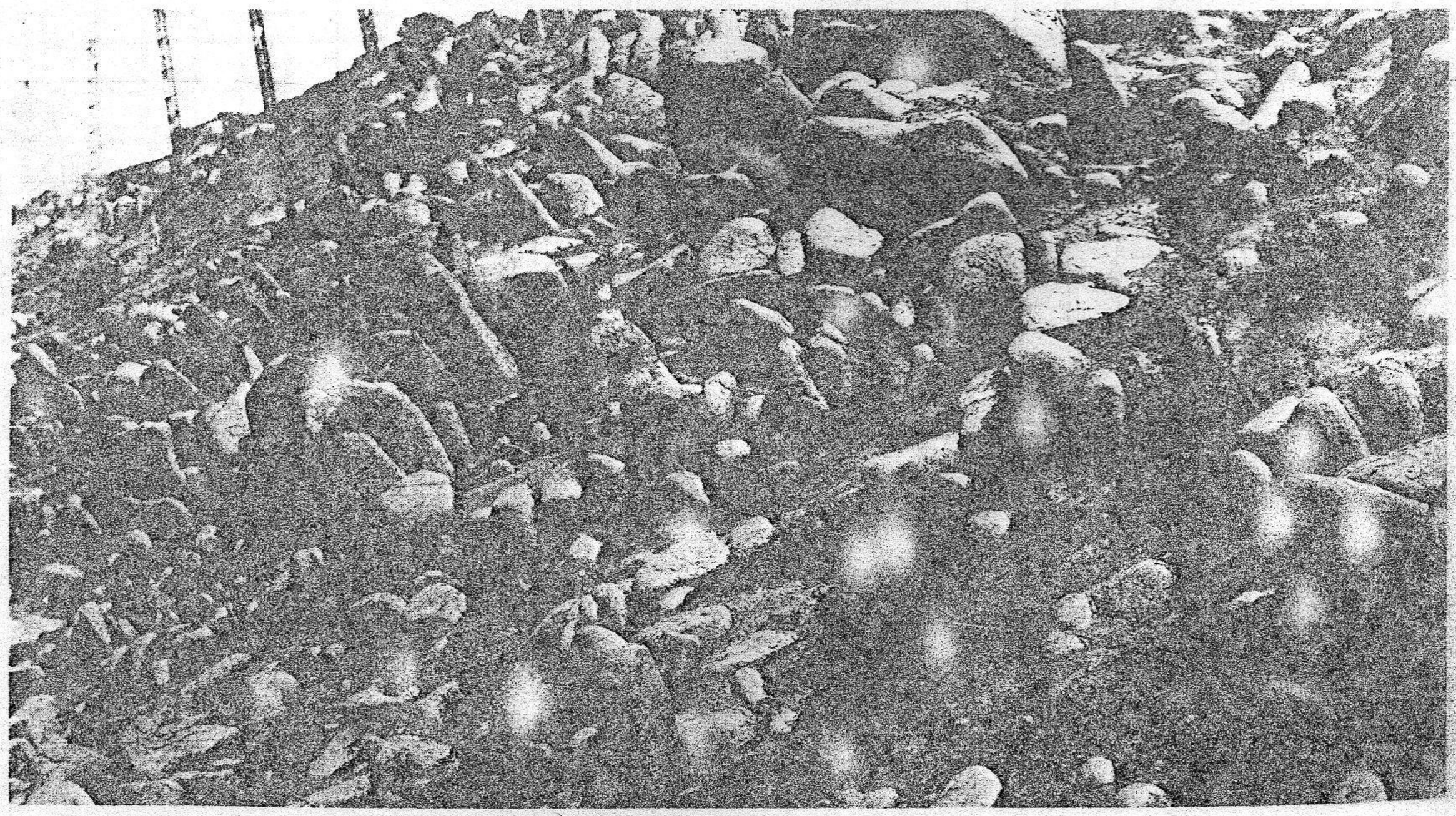
madre. Porque cuando un mineral se «hidrata», lo que entra a formar parte de su nueva malla cristalina es el ion $(OH)^-$. La fuente de iones hidroxilo no es sólo el agua, sino una reacción entre el agua y los iones de oxígeno:

$$H_2O + O^{2-} = 2(OH)^-$$

El aumento resultante del número de iones negativos (aniones) en relación con los positivos (cationes) favorece la mayor estabilidad, o sea, la resistencia a la meteorización. Si representamos el número de cationes de la fórmula de un mineral por 100, se encuentra fácilmente la proporción de los aniones correspondientes. Para el cuarzo, SiO_2, es de 200. El cuarzo es un mineral muy resistente a la meteorización, igual que la moscovita, con 170 aniones. Los minerales con números menores que éste se descomponen en productos residuales más estables, con un número más alto. Los feldespatos (160) dan productos sucesivos que forman una serie de estabilidad creciente: hidromica (200) → arcilla (225) → bauxita (250-300). Los minerales ferromagnésicos, hornblenda (160), augita (150), biotita (150) y olivino (133) dan clorita (180) o serpentina (180) y limonita (200-300). De ellos, el olivino, con la proporción de aniones más baja, es el que se descompone más rápidamente de todos los minerales comunes que forman las rocas. De acuerdo con estas cifras, el granófilo y la mayor parte de las demás rocas graníticas resisten mejor el ataque de la meteorización química que los basaltos y las doleritas, en especial aquellas variedades que contienen olivino.

La meteorización química contribuye a la desintegración de las rocas: *a*) por un debilitamiento de la coherencia entre los minerales, con lo cual la roca resiste menos el ataque de los agentes físicos; *b*) por la formación de soluciones que son arrastradas por el agua de lluvia, de modo que la roca se vuelve porosa y deleznable (como en el caso de la liberación de los granos de una arenisca por disolución del cemento), y *c*) por la formación de productos de alteración de volumen mayor que el del material original, con lo cual la cubierta externa se dilata y se desprende de la roca inalterada interna. En la exfoliación, la única alteración de este tipo que se ha detectado es la formación de clorita en lugar de biotita.

Figura 14.10. Cantos rodados residuales de dolerita formados por meteorización esferoidal, manto interestratificado del norte de Queensferry, Fife *(Instituto de Ciencias Geológicas de Gran Bretaña).*



La separación de costras de material rocoso claramente alterado se llama *meteorización esferoidal* (fig. 14.9). Está mejor desarrollada en rocas muy diaclasadas que, como muchos basaltos y doleritas, se descomponen muy fácilmente. El agua penetra en las juntas y ataca simultáneamente, por todos los lados, cada bloque separado. Como la profundidad de descomposición es mayor en vértices y aristas que en superficies planas, las superficies de fractura se van volviendo romas. A medida que se suelta una costra, una nueva superficie queda expuesta a las soluciones atacantes, y el proceso se repite indefinidamente con la ayuda, según el clima, de cambios de temperatura que pueden o no incluir heladas.

Cada envoltura sucesiva en torno al núcleo rocoso (si es que lo hay) se hace más esférica que la que la envuelve a ella, hasta que el bloque angular se transforma en una estructura parecida a la de una cebolla, de capas concéntricas de material residual alterado y herrumbroso. Cuando la erosión arrastra las cáscaras blandas externas, a veces quedan núcleos de roca más fresca y coherente a modo de guijarros (fig. 14.10). Cantos o bloques rodados de granito, a veces de gran tamaño (fig. 14.11), probablemente son el resultado de la exfoliación ayudada por la meteorización esferoidal.

Las rocas basálticas no tienen por qué formar cáscaras ferruginosas de materiales residuales cuando están expuestas a la intemperie. Bajo condiciones adecuadas, todos los constituyentes de la roca pueden disolverse y ser eliminados por arrastre, incluso los compuestos de hierro y aluminio, dejando afloramientos superficiales de apariencia casi fresca. En ambientes apropiados, las superficies verticales de diaclasas de basaltos y doleritas compactos se acanalan con surcos semicilíndricos llamados lapiaz, formas de disolución ya mencionadas en el caso más simple de las calizas. Se han descrito en regiones tan alejadas entre sí como Hawaii (fig. 14.12), Nueva Zelanda y Slieve

Figura 14.11. Bloques rodados residuales de granito formados por la combinación de exfoliación y meteorización esferoidal, colgados en la cima de una superficie granítica exfoliada, Matopo Hills, Rodesia *(C. T. Trechmann).*

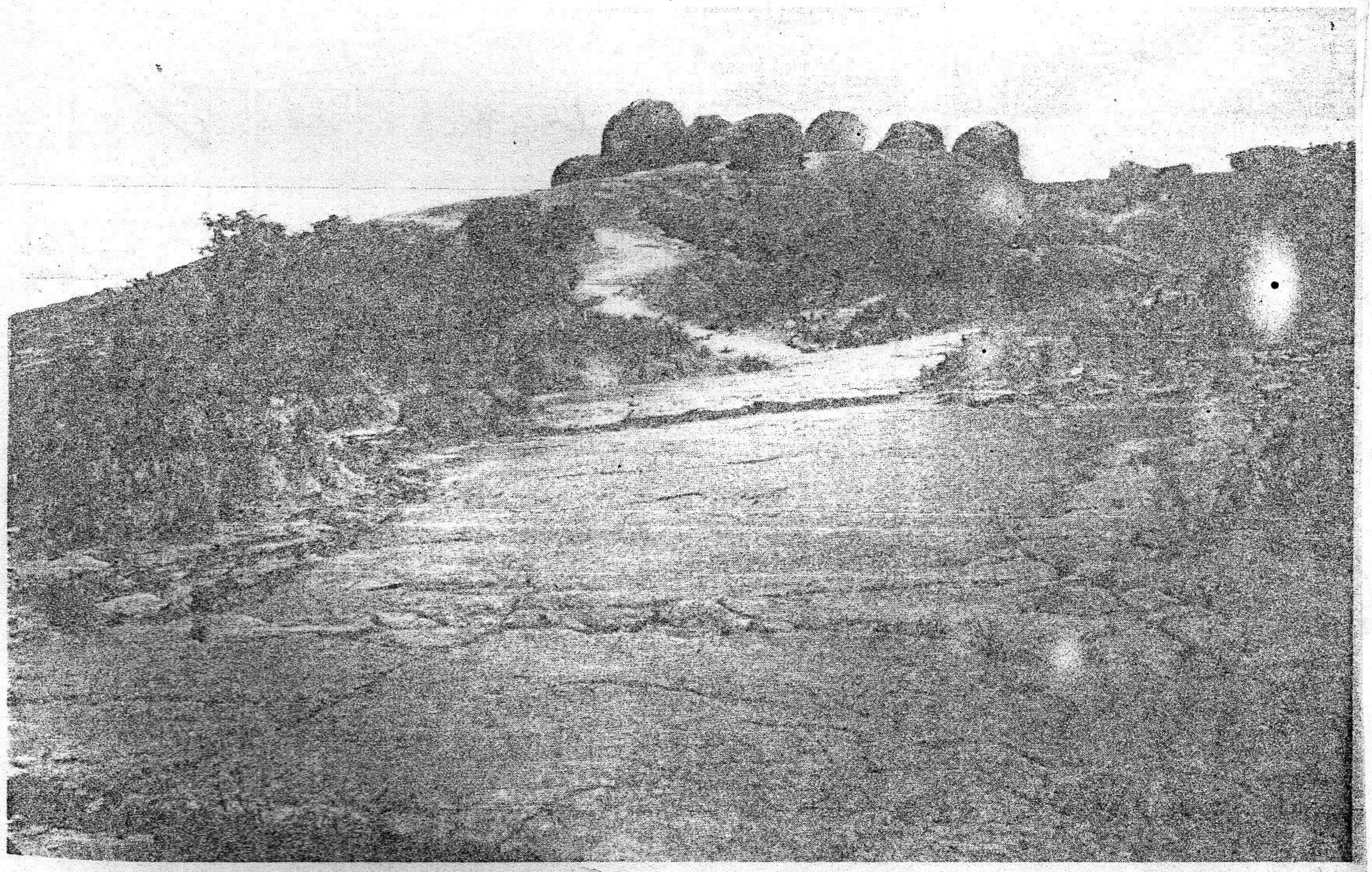


Figura 14.12. Lapiaz formado por meteorización química y erosión a lo largo de planos de diaclasas verticales en basalto olivínico impermeable, Oahu, Hawaii (*H. S. Palmer* 1927).

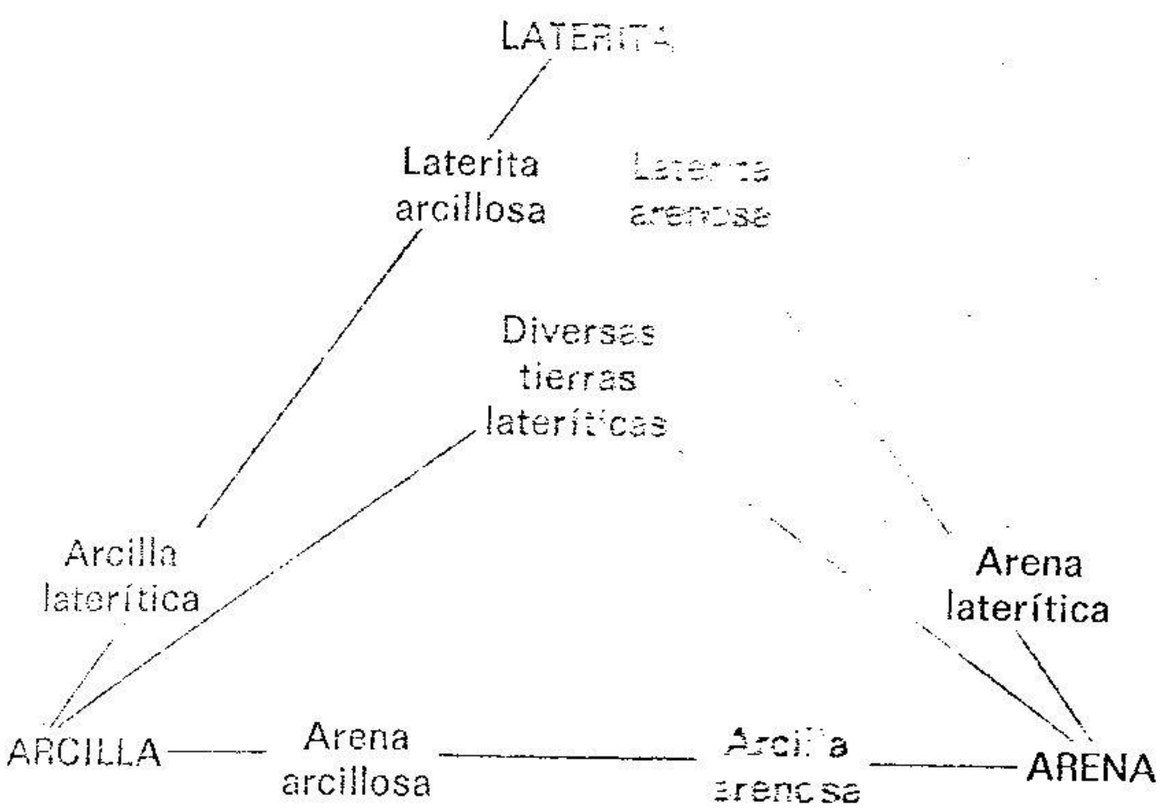
Gullion, en Irlanda del Norte. La disolución completa de los minerales basálticos requiere un agua de acidez poco corriente (de pH entre 2,8 y 3,7), como la que resulta del paso a través de pantanos y turberas y del goteo de una vegetación espesa. Las aguas responsables de la meteorización esferoidal tienen valores de pH de entre 4 y 8.

Residuos de la meteorización

En laderas rocosas escarpadas y en rocas cristalinas masivas de las regiones áridas, la cubierta de material meteorizado por procesos químicos puede no ser más que una delgada película. Pero allí donde el agua de lluvia y la del suelo— empapa las rocas hasta una profundidad grande, la meteorización puede llegar muy adentro. En las regiones de lluvias copiosas y uniformemente distribuidas, el granito puede convertirse en una tierra blanda y friable hasta profundidades de 15-30 metros. En las regiones tropicales que tienen una estación húmeda, de precipitación abundante, y otra seca, de temperatura alta y evaporación rápida, los residuos de alteración pueden ser muy diferentes. Las plantas toman el agua del suelo, y mientras queda agua en el subsuelo, ésta sube para reponer la gastada. Las soluciones diluidas producidas por la lixiviación de las rocas durante la estación húmeda se concentran debido a la evaporación y se depositan los materiales disueltos, empezando por los menos solubles. Los productos incluyen hidróxidos de hierro y aluminio, sílice y diversos carbonatos y sulfatos. La mayor parte de ellos se redisuelven con las lluvias de la siguiente estación húmeda, pero los hidróxidos de aluminio y de hierro quedan en un estado muy insoluble. Quedan en superficie o cerca de ella y, gradualmente, se van acumulando en forma de un depósito pardo-rojizo llamado *laterita* (del latín, *later*, ladrillo). En profundidad, el material es abigarrado y de color más pálido, ya que es donde tiende a concentrarse especialmente la alúmina. A profundidades mayores, la roca puede estar muy descompuesta y presentar un abundante desarrollo de minerales arcillosos.

Las acumulaciones de laterita no suelen ser muy potentes —un espesor de 10 metros es excepcional— debido a que, al ser impermeables, su propia formación impide el drenaje, que es esencial para que sigan formándose. También por este motivo el suelo que las recubre se vuelve estéril y como ya las raíces no lo mantienen unido es fácilmente arrastrado por lluvias torrenciales. Las extensiones de superficies lateríticas estériles que quedan pueden resistir mucho tiempo la erosión ulterior. En determinadas regiones, como en algunas partes de la India, se encuentran lateritas muy blandas bajo la costra dura y escoriácea superficial. La laterita blanda se puede cortar fácilmente en ladrillos, que se endurecen si se exponen al sol. Este material de construcción valioso y fácil de trabajar, se llamó laterita, no porque parezca un ladrillo, sino porque de ella se hacen ladrillos.

El cuarzo y los minerales arcillosos que no han llegado a perder la sílice, quedan en los depósitos, en distintas proporciones y en forma de cemento. Hay toda la gama posible entre el cuarzo (mineral principal de la arena), la arcilla (compuesta principalmente de minerales arcillosos) y la laterita, como indica el esquema siguiente:



Entre las propias lateritas se distinguen dos variedades importantes: las ricas en hierro y las ricas en aluminio. Estas últimas, si son de calidad, constituyen la bauxita, única mena de aluminio que permite la extracción del metal a escala realmente comercial.

La cobertera de derrubios

Los depósitos superficiales que yacen sobre un zócalo de rocas más antiguas y coherentes forman un manto de derrubios de características muy variadas. En este contexto se hace necesario hablar de la *cobertera* o *manto de derrubios* (si se utiliza el término «manto» hay que diferenciarlo del *manto subcortical* de la tierra). En muchos sitios la cobertera de derrubios cubre directamente la roca de la que procede por meteorización. En este caso, los cortes efectuados en canteras y en otras partes generalmente muestran una capa superficial de *suelo* que hacia abajo pasa gradualmente por una zona de roca fragmentada y parcialmente descompuesta, llamada subsuelo, y a la roca madre, todavía relativamente fresca y no meteorizada. La extensión en profundidad del mantillo y el humus del suelo vegetal es variable y, en condiciones adecuadas, éstos se acumulan formando capas de turba que suelen considerarse parte de la cobertera. Sin embargo, el suelo no se desarrolla sólo en la roca viva, sino también en una gran variedad de depósitos sueltos que han sido transportados por acción de la gravedad, del viento, del agua corriente o del hielo en movimiento. De estos depósitos transportados se tratará más adelante. Aquí se da un resumen de ellos, atendiendo a su modo de origen y junto con los depósitos no transportados o sedentarios de la cubierta de

COBERTERA DE DERRUBIOS
(depósitos continentales)

Modo de origen		*Depósitos característicos*
SEDENTARIA		
Esencialmente inorgánica	*Residual*	Grava, arena, limo y arcilla.
Inorgánica y orgánica	*Suelo*	*Terra rossa*, tierras lateríticas y laterita Incluyendo suelos sobre la roca viva (suelos de roca) y sobre los depósitos de cobertera (suelos transportados)
Esencialmente orgánica	*De acumulación*	Residuos vegetales: depósitos cenagosos y turba
TRANSPORTADA POR		
Gravedad	*Coluvial*	Canchales y desplomes de ladera
Viento	*Eólica*	Dunas de arena, derrubios de arena y loess
Hielo	*Glacial*	Arcilla guijarrosa, morrenas y drumlins
Agua de fusión del hielo	*Fluvioglacial*	Conos de deyección, kames y éskeres
Ríos (depositada en lagos)	*Lacustre*	Aluviones y depósitos salinos
Ríos	*Fluvial*	Aluviones que llegan al mar pasando de depósitos *deltaicos* o *estuarinos* a depósitos *marinos*

ingeniería, el término «suelo» se refiere a todos los sedimentos no consolidados que recubren la roca viva. La «mecánica de suelos» es el estudio del comportamiento que tiene el suelo —seco, húmedo o helado— cuando se le somete a las cargas debidas a la construcción de edificios y, en general, a los esfuerzos debidos a estructuras de ingeniería.

Desarrollo y naturaleza de los suelos

Bacterias, líquenes o musgos son los primeros colonizadores de la materia puramente mineral de los depósitos residuales y transportados. Por descomposición parcial de los organismos muertos empiezan a acumularse mantillo y humus; así se proporciona un soporte para helechos y hierbas; el viento y las aves llevan granos y semillas; y finalmente pueden afianzarse arbustos y árboles. Las raíces penetran, los animales excavadores aportan partículas inorgánicas y la masa creciente se hace porosa y esponjosa y, por lo tanto, capaz de retener agua y de permitir la circulación de aire. Las heladas y las lluvias juegan su papel y, finalmente, se forma un suelo maduro, mezcla compleja de productos minerales y orgánicos. Pero aunque el suelo es un producto de descomposición, también es un medio de crecimiento. Rebosa de vida y, como la fuente principal de alimentos, es uno de los tres bienes indispensables de la humanidad. El suelo es la base de la pirámide de la vida en tierra. Su fertilidad depende del adecuado equilibrio entre aire y agua, minerales y elementos traza, humus y una población sana de bacterias y otros organismos inferiores.

Desde un punto de vista geológico, se puede definir el suelo como la capa superficial de la cubierta de derrubios en la que los procesos físicoquímicos de meteorización cooperan en íntima asociación con los procesos biológicos. Todos estos procesos dependen del clima y, de acuerdo con este hecho, se tiene que los suelos resultantes también varían con el clima en el que se desarrollan. Además, hay otros factores implicados: en especial la naturaleza de la roca madre o de otros depósitos sobre los que se ha desarrollado el suelo, la edad del suelo (o sea, la cantidad de tiempo durante el cual se ha estado formando el suelo), y los efectos superpuestos debidos al cultivo.

La arena forma un suelo que para muchas plantas es demasiado ligero, ya que es demasiado poroso para retener el agua. La arcilla, por el contrario, es demasiado impermeable. La mezcla de arena y arcilla forma un *loda* que evita estos extremos y constituye la base de un suelo excelente. Un suelo arcilloso también puede mejorarse añadiéndole caliza, y la mezcla natural, llamada *marga,* también constituye una base favorable. Ya hemos visto que la caliza sola no puede formar un suelo, a no ser que contenga impurezas. En la mayoría de los climas, el granito se descompone lentamente y cede sus reservas alimenticias para las plantas de un modo muy gradual. En cambio, las rocas basálticas se degradan mucho más rápidamente. Las cenizas y lavas volcánicas dan suelos muy productivos que, incluso en los flancos de volcanes activos, compensan al agricultor y al viticultor de sus riesgos periódicos de peligro y posible destrucción.

Estas diferencias son más marcadas en suelos jóvenes y en regiones templadas. A medida que el suelo envejece, y en especial cuando el clima es de tipo más extremo, la influencia de una meteorización mantenida mucho tiempo y del crecimiento y descomposición orgánicos se hace sentir cada vez más. Algunos ingredientes son constantemente lixiviados, y otros se concentran. La acumulación de humus depende del predominio del crecimiento sobre la descomposición, el cual, a su vez, depende de factores climáticos. Así, la composición del suelo en evolución se va aproximando gradualmente a la de ciertos tipos característicos que son diferentes en cada región climática. El suelo negro de la estepa rusa, por ejemplo, se desarrolla igualmente bien en granito, basaltos, loess y arcillas guijarrosas. Recíprocamente, un tipo único de roca, como el granito, en regiones templadas da suelos grises *(podsol)*, en las estepas, negros *(chernosem)*, y en regiones tropicales de abundante precipitación los da rojos *(suelos lateríticos)*. Los colores del suelo dependen casi totalmente de la abundancia (o escasez) relativa de diversos compuestos de hierro y de humus.

Los suelos intensamente cultivados pueden resultar más o menos uniformizados, pero éste no es el caso de los suelos puramente naturales. Un corte vertical de un suelo natural viejo pone de manifiesto la existencia de una disposición en ca-

Tipos climáticos de suelos y depósitos residuales asociados

	Regiones climáticas	*Vegetación característica*	*Principalmente orgánicos*	*Mezcla de orgánicos e inorgánicos*	*Principalmente o enteramente inorgánicos*
TEMPLADA HÚMEDA ÁRTICA	Glacial	—	—	—	—
	Tundras (corto verano moderado)	Musgos y líquenes	Suelos turbosos Turba	Suelos pedregosos fragmentados por las heladas Suelos poligonales	
	Boreal (invierno frío)	Bosques de coníferas	Suelos turbosos Turba	PODSOL (gris)	
	Templada (moderada y húmeda)	Bosques de coníferas y variados	Suelos turbosos Turba	PODSOL (gris) Tierras forestales grises	
	Mediterránea (corto invierno suave)	Arbustos y árboles de hoja perenne		Tierras forestales pardas	*Terra rossa*
ÁRIDA Y SEMIÁRIDA	Estepas (verano seco)	Hierbas		CHERNOSEM (negro) Suelos pardocastaños	
	Desiertos	Arbustos marginales — Id. Id.		Suelos grises marginales — Suelos grises marginales	Incrustaciones salinas blancas Arenas desérticas Incrustaciones salinas blancas
LLUVIOSA TROPICAL	Sabanas (estaciones húmeda y seca)	Praderas y árboles dispersos		Suelos pardos Suelos negros	LATERITA
	Países de monzones (estaciones húmeda y seca)	Bosques: Mezclados y de tránsito a la selva subtropical	Suelos pantanosos Turba	Tierras pardas lateríticas Tierras rojas lateríticas	Laterita (roja, rojiza y parda)
	Ecuatorial (permanentemente húmeda)	Selva lluviosa tropical siempre verde	Suelos pantanosos Turba	Tierras pardas Tierras grises blanqueadas	

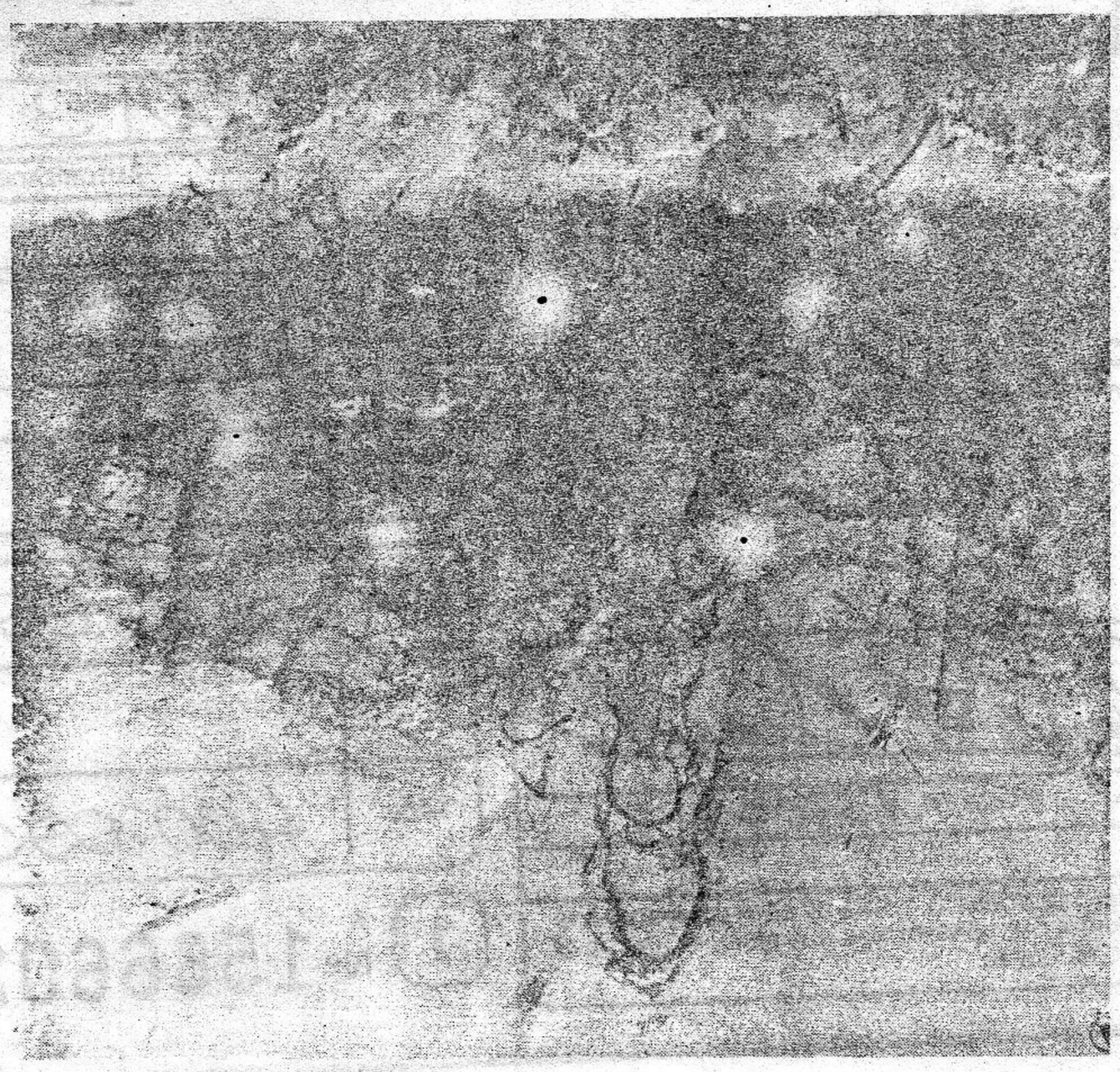


Figura 14.13. Perfil de suelo de tipo podsol constituido de aluviones arenosos de color neutro C, formados en el descenso del agua del suelo que se ha enriquecido en humus al pasar por A_1 (mantillo vegetal y humus), que recibe la aportación de una cobertera de brezo; localidad próxima a Eindhaven, Holanda. A_2 es la zona de suelo gris blanquecino del cual el podsol toma su nombre; los hidróxidos de hierro han sido lixiviados en forma de material ferrohúmico y se han fijado, junto con las partículas arcillosas arrastradas hacia abajo, en la zona oscura y más compacta B_1, que en ocasiones puede convertirse en una costra dura. La migración persistente hacia abajo provoca la precipitación periódica de materiales ferruginosos en la zona B_2, que suele ser moteada o a veces bandeada, como aquí. Allí donde hay pasos de penetración favorables, lenguas localizadas de B_2 pueden invadir la roca madre C. *(Departamento de Agricultura de los EE.UU. de América, fotografía de Roy W. Simonson).*

pas que se llama *perfil del suelo* (fig. 14.13). Las capas sucesivas de un tipo de perfil son bien patentes en los suelos grises de la zona templada norte, más o menos cubierta de bosques, de Canadá, norte de Europa y Asia. Como el drenaje es fundamentalmente descendente, los hidróxidos de hierro y el humus procedentes de la capa de mantillo superficial descienden en solución coloidal. Así se desarrolla una zona blanquecina y por eso el suelo tipo se llama *podsol* (en ruso, suelo gris ceniciento). Por la acumulación de material ferrohúmico a unos 5-30 cm de profundidad, acompañada de partículas de limo y arcilla arrastradas mecánicamente por el agua, se forma una capa pardo-oscura o casi negra de espesor variable. Ésta puede transformarse en una banda dura, bien cementada, impermeable al drenaje, que se denomina *costra dura* («hardpan»). Uno de los objetivos de la labranza es evitar el crecimiento de esta costra. De lo contrario, el agua se encharcaría, y tendería a favorecer la acumulación de turba.

Más al sur, en las praderas y estepas cubiertas de hierba, las sequías del verano y las heladas invernales favorecen la acumulación de humus, procedente de las raíces de la hierba que muere cada año. En la estación seca, el agua subterránea sube a la superficie y precipita CO_3Ca, a menudo en nódulos irregulares, a profundidades de entre 60 y 90 cm. Bajo la influencia de las soluciones calcáreas ascendentes, el humus se vuelve negro, como en el podsol. La capa superior del perfil del suelo es negra, y en profundidad, donde hay menos humus, pasa a un color pardo. Por esto el suelo tipo se llama *chernosem* (en ruso, tierra negra). Los suelos negros de los cultivos de algodón de la India y los «black bottoms» de las llanuras aluviales del Mississippi tienen un origen análogo.

Referencias seleccionadas

Bridges, E. M., 1970, *World Soils*, Cambridge University Press, London.

Carroll, D., 1970, *Rock Weathering*, Plenum Press, New York.

Chapman, R. W., and Greenfield, Mildred A., 1949, 'Spheroidal weathering of igneous rocks', *American Journal of Science*, vol. 247, pp. 407–29.

Frederickson, A. F., 1951, 'Mechanism of weathering', *Bulletin of the Geological Society of America*, vol. 62, pp. 221–32.

Haw, R. C., 1959, *The Conservation of Natural Resources*, Faber and Faber, London.

HUNT, C. B., 1972, *The Geology of Soils*, Freeman, San Francisco.
JACKS, J. V., 1954, *Soil*, Nelson, London.
PRESCOTT, J. A., and PENDLETON, R. L., 1952, 'Laterite and lateritic soils', *Technical Communication* No. 47. Commonwealth Bureau of Soil Science, Farnham Royal, Bucks., England.
REICHE, P., 1950, 'A survey of weathering processes and products', *University of New Mexico Publications in Geology*, No. 1.
REYNOLDS, DORIS L., 1961. 'Lapiés and solution pits in olivine-dolerite sills at Slieve Gullion, N. Ireland', *Journal of Geology*, Chicago, vol. 69, pp. 110–17.